

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИИ ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИХ КАПЕЛЬ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Ашихмин А.Е., Семенова А.Е., Хомутов Н.А.

Научный руководитель - доцент М.В. Пискунов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Взаимодействие капли с твердыми поверхностями рассматривается как сложный многофакторный процесс, зависящий как от свойств жидкости, так и поверхности взаимодействия. Несмотря на сложность данного процесса, он встречается во многих промышленных технологиях и приложениях бытового использования, таких как струйная печать, 3D печать, спрейное охлаждение, спрейное распыление в двигателях внутреннего сгорания, фармацевтика и пищевая промышленность [5].

В многочисленных работах, посвященных динамике соударения капли с поверхностью, рассматриваются кинетическая энергия (сила инерции), поверхностная энергия (капиллярная сила), и энергия вязкой диссипации как основные движущие и определяющие силы процесса взаимодействия [3,6]. Взаимодействие капли с поверхностью обычно описывается несколькими безразмерными критериями, отражающими отношения определяющих процесс сил, а именно числом Вебера (We), числом Рейнольдса (Re) и числом капиллярности [1]. Одной из основных характеристик, описывающей динамику растекания, является коэффициент максимального растекания (β_{max}) (максимальный диаметр растекания D_{max} , нормализованный с помощью диаметра капли D_0). Большинство исследований в этой области посвящено изучению однофазных ньютоновских жидкостей, однако во многих практических приложениях и технологиях используются многокомпонентные жидкости (зачастую неньютоновские, например с вязкоупругим или вязкопластичным поведением) [1]. Вязкость таких жидкостей зависит от скорости сдвига, поэтому динамику растекания сложно описать только с помощью вязкости. Для характеристики неньютоновских жидкостей, при взаимодействии с твердой поверхностью, следует использовать реологические свойства, которые связывают напряжение сдвига (σ) и скорость сдвига ($\dot{\gamma}$) [4]. Одним из таких свойств, например, является предел текучести (τ_0), который определяет, когда жидкость начинает течь, а не деформироваться как твердое тело. В настоящий момент влияние реологических характеристик неньютоновских жидкостей на взаимодействие капли с твердой поверхностью остается малоизученным. Поэтому целью данной работы является исследование влияния реологических свойств ньютоновских и неньютоновских эмульсий на динамику растекания капель на твердой не нагретой поверхности.

Обратные эмульсии типа «вода-в-масле» приготовлены из таких несмешивающихся компонентов как дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы, н-декан и масло базовое изопарафиновое в качестве непрерывной фазы. В таблице 1 приведен компонентный состав эмульсий. В качестве эмульгаторов использованы сорбитанмонолеат (Спан-80) и лецитин соевый.

Таблица 1

Компонентный состав эмульсий

№ эмульсии	Вода, гр.	Н-декан, гр.	Масло, гр.	Эмульгатор, гр.	Наименование эмульгатора	Масса образца, гр.
Е1	0,8	12	3,04	0,16	Спан 80	16
Е2	0,8	4	11,04	0,16	Спан 80	16
Е3	0,8	15,04	0	0,16	Соевый лецитин	16

Составы эмульсий приготовлены при комнатной температуре в стеклянной лабораторной посуде при перемешивании гомогенизатором (скорость вращения 10 тыс. об/мин, время перемешивания 3 минуты). Динамическая вязкость измерялась на ротационном вискозиметре. Плотность вычислялась пикнометрическим методом. Измерение поверхностного натяжения проводилось методом отрыва кольца. Свойства исследуемых жидкостей при комнатной температуре приведены в таблице 2. Исследование взаимодействия капли с твердой поверхностью выполнено методом высокоскоростной видеорегистрации.

Таблица 2

Физические свойства эмульсий и их компонентов

Жидкость	Плотность (ρ), кг/м ³	Динамическая вязкость (ν), мПа·с	Поверхностное натяжение (σ_0), мН/м
Дистиллированная вода	997	0,89	71,98
н-Декан	730	0,84	25,55
Е1	750	неньютоновская	24,41
Е2	801	неньютоновская	26,84
Е3	738	1,13	24,34

В данном исследовании для изучения динамики взаимодействия капель ньютоновских и неньютоновских жидкостей с твердой не нагретой поверхностью используются безразмерные параметры, такие как капиллярное число Бингама ($\tilde{B} = D_0 \tau_0 / \sigma_0$), число Рейнольдса для ньютоновских жидкостей ($Re = \rho U_0 D_0 / \mu$), неньютоновское число Рейнольдса ($Re_n = \rho D_0^n U_0^{(2-n)} / k$) и коэффициент максимального растекания β_{max} , где U_0 – скорость капли перед непосредственным взаимодействием с поверхностью, μ – кинематическая вязкость, n – показатель текучести (показатель степени из выражения для модели Гершеля-Балкли), k – пластическая вязкость.

Исходя из зависимости, представленной на рисунке 1, следует, что вязкость эмульсий Е1 и Е2 заметно уменьшается при увеличении скорости сдвига ($\dot{\gamma}$). Реологическое поведение этих жидкостей хорошо описывается

моделью Бингама для неньютоновских жидкостей при рассмотрении зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига, $\sigma(\dot{\gamma})$. В свою очередь, вязкость эмульсии ЕЗ не зависит от скорости сдвига (ньютоновское поведение).

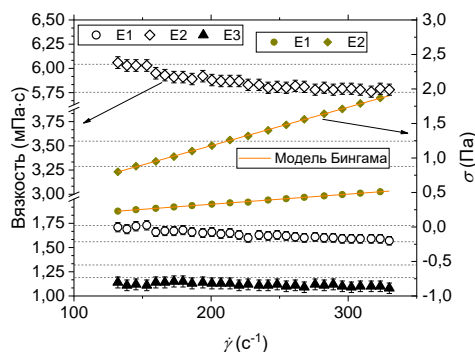


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости эмульсий и напряжения сдвига от скорости сдвига

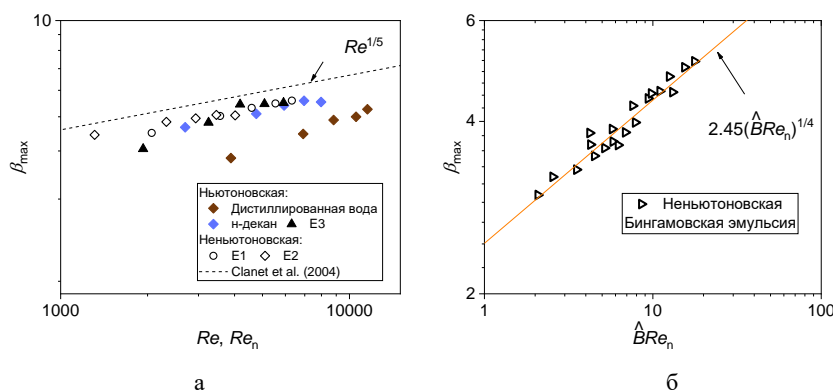


Рис. 2. Максимальный диаметр растекания в зависимости от Re или Re_n (зависит от реологического поведения жидкости) (а); влияние капиллярного числа Бингама, масштабированного с помощью Re_n на коэффициент максимального растекания капли (б)

На рисунке 2 демонстрируется влияние числа Рейнольдса для ньютоновских и неньютоновских жидкостей на β_{max} . Из зависимости видно, что значения β_{max} для неньютоновских эмульсий достаточно близки к теоретической зависимости $Re^{1/5}$ [2] для капель однофазных ньютоновских жидкостей. Тем не менее, расхождение экспериментальных значений от теории является довольно заметным. Предполагается, что для капель ньютоновских жидкостей сильное расхождение результатов сравнения говорит о необходимости учета не только сил инерции и вязкости, но и сил поверхностного натяжения [1,3,6]. Число Re_n рассматривает все реологические свойства неньютоновской жидкости, за исключением предела текучести τ_0 . Он учитывается в капиллярном числе Бингама \hat{B} . Чтобы учесть все реологические свойства (включая предел текучести) Бингамовских эмульсий, а также влияние инерционных и капиллярных сил, β_{max} представлен как функция от произведения $\hat{B}Re_n$ (рис. 2б). Соотношение характерных сил в произведении $\hat{B}Re_n$ определяет характер поведения максимального диаметра растекания капли неньютоновской Бингамовской жидкости довольно точно (рис. 2б) согласно эмпирическому соотношению $\beta_{max} = 2,45(\hat{B}Re_n)^{1/4}$.

Полученная эмпирическая зависимость, учитывающая все реологические свойства неньютоновских эмульсий, а также инерционные и капиллярные силы, позволяет описывать динамику растекания их капель на твердой не нагретой поверхности в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Литература

1. Blanken N. et al. Impact of compound drops: a perspective // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 51.
2. Clanet C. et al. Maximal deformation of an impacting drop // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 517, № January 2014. P. 199–208.
3. Josserand C., Thoroddsen S.T. Drop Impact on a Solid Surface // Annu. Rev. Fluid Mech. 2016. Vol. 48, № 1. P. 365–391.
4. Kim E., Baek J. Numerical study of the parameters governing the impact dynamics of yield-stress fluid droplets on a solid surface // J. Nonnewton. Fluid Mech. Elsevier, 2012. Vol. 173–174. P. 62–71.
5. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 106. P. 103–126.
6. Yarin A.L., Roisman I. V., Tropea C. Collision phenomena in liquids and solids // Collision Phenomena in Liquids and Solids. 2017.